



Desplazamiento vertical del terreno y cambios en el nivel del mar en la zona sur de Puerto Rico a causa de la Secuencia Sísmica iniciada el 28 de diciembre de 2019



Kevin Martínez López¹, Carlos O. Rivera Ortiz²

¹Departamento de Física, Universidad de Puerto Rico, Recinto de Mayagüez, Mayagüez, PR 00681

²Departamento de Geología, Universidad de Puerto Rico, Recinto de Mayagüez, Mayagüez, PR 00681

Abstracto: Este proyecto se enfoca en los cambios en la elevación del terreno y del mar ocasionados por la Secuencia Sísmica iniciada el 28 de diciembre de 2019 en la zona sur de Puerto Rico. Las imágenes utilizadas para el estudio fueron adquiridas de la base de datos del satélite Sentinel-1A. Se utilizó el programa SNAP y ENVI (versión 5.6) para realizar este estudio. Se observó un descenso de 0.05 a 0.10 metros (2-4 pulgadas) en la zona epicentral, con hundimientos máximos de 0.144 metros (~5.67 pulgadas) y 0.135 metros (~5.31 pulgadas) a 630m al NNO del epicentro del terremoto de M6.4 y en la comunidad El Faro en Guayanilla, respectivamente. Se identificó un pequeño componente vertical en la falla de Punta Montalva, la cual es de corrimiento lateral izquierdo. El nivel del mar aumentó relativamente en las zonas costeras desde Guánica hasta Ponce, especialmente en Guayanilla, aumentando la vulnerabilidad de las comunidades costeras ante eventos atmosféricos y tsunamigénicos. También, el mayor cambio en la elevación del terreno provocado por esta secuencia ocurrió en el barrio Marueño en Ponce, Puerto Rico donde descendió unos 0.162 metros (~6.41 pulgadas).

Palabras claves: ENVI 5.6, SNAP, Puerto Rico, Secuencia Sísmica 2019-20, Mapas de Desplazamiento, Nivel del Mar, Guánica, Guayanilla, Ponce, Punta Montalva

1. Introducción:

Desde el 28 de diciembre de 2019, la zona sur de Puerto Rico ha estado experimentando una Secuencia Sísmica compleja. Hasta inicios de diciembre 2020, la Red Sísmica de Puerto Rico (RSPR)

reportó cerca de 12,000 sismos en esta zona, de los cuales 1,200 han sido reportados como sentidos (**imagen 1**). La RSPR ha registrado 15 temblores con magnitud mayor a 5.0.

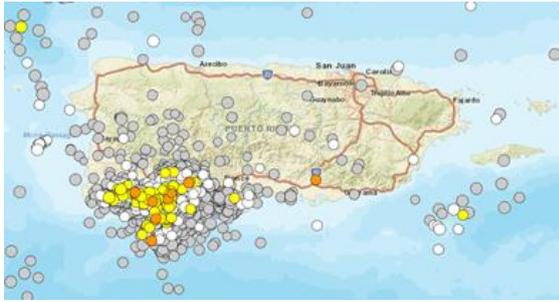


Imagen 1: Sismos en Puerto Rico desde el 28 de diciembre de 2019 hasta el 9 de diciembre de 2020, a más de 11 meses del inicio de la Secuencia Sísmica del suroeste. Crédito: [USGS](https://www.usgs.gov/).

Esta secuencia ha sido catalogada por los sismólogos como una de las más activas de las que se tenga registro en el mundo. El evento principal se registró a las 4:24 a.m. del 7 de enero de 2020 con una magnitud de 6.4, profundidad de 6 kilómetros y epicentro justo en la costa suroeste de Guayanilla. Este sismo provocó un pequeño tsunami local de aprox. 2 pulgadas de amplitud (**imagen 2**).

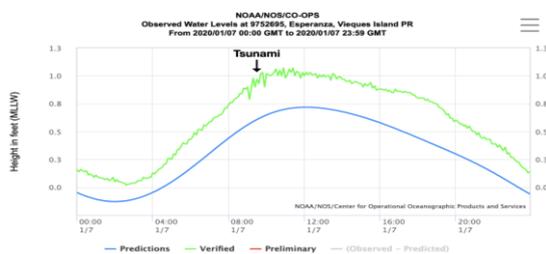


Imagen 2: Mareógrafo de Esperanza en Vieques, P.R., del 7 de enero de 2020 donde muestra el tsunami local luego del sismo magnitud 6.4. Crédito: [NOAA](https://www.noaa.gov/).



Imagen 3: Daños provocados por la Secuencia Sísmica en una residencia del sector La Luna en Guánica, P.R. Crédito: Kevin Martínez López.

A consecuencia de los constantes movimientos telúricos, muchas residencias fueron perdiendo estabilidad y se agrietaron o colapsaron (**imagen 3**), mayormente las que estaban sobre columnas. Esto dejó a múltiples familias sin hogar, las cuales tuvieron que pasar noches acampando al aire libre en campamentos improvisados (**imagen 4**). Además, se reportaron varios deslizamientos de tierra, los cuales dejaron varias carreteras intransitables por varias horas o hasta varios días (**imagen 5**).

Debido a los daños provocados por esta secuencia sísmica, decidimos estudiar si hubo un cambio o deformación en la superficie de la zona sur de la isla. Para esto utilizamos la técnica de teledetección de



Imagen 4: Campamentos improvisados en el sector La Luna en Guánica, P.R., en los cuales muchas familias, ya sea por precaver o por haber quedado sin hogar, se tuvieron que refugiar de forma temporera. Crédito: Kevin Martínez López.



Imagen 5: Deslizamiento de tierra en la carretera Caña Gorda en Guánica, P.R. Crédito: Kevin Martínez López.

InSAR o interferometría SAR (Synthetic Aperture Radar). Esta técnica depende mucho de la resolución temporal y es utilizada para monitorear las deformaciones y/o cambios en la elevación del terreno en: glaciares, terremotos, volcanes, deslizamientos, deformaciones en acuíferos debido a la extracción de agua, actividades mineras, trabajos de construcción, entre otros. En nuestro caso, la resolución temporal es de 12 días.

2. Objetivos:

El objetivo principal de esta investigación fue observar los cambios producidos en la zona sur de Puerto Rico a causa de la Secuencia Sísmica que comenzó el 28 de diciembre de 2019. Al estudiar esta zona y como hipótesis, se esperan cambios en la elevación del terreno alrededor del epicentro del sismo principal. En adición, debido al cambio en la elevación del terreno, se espera que haya ocurrido algún cambio en el nivel del mar.

En consecuencia, los objetivos específicos son:

1. Investigar si hubo desplazamiento vertical en la región suroeste de Puerto Rico entre diciembre 2019, antes de la Secuencia Sísmica, y enero 2020, posterior a los sismos de mayor magnitud.
2. Investigar si hubo desplazamiento vertical **adicional** en la región suroeste de Puerto Rico, posterior a los eventos sísmicos de mayor

magnitud que ocurrieron entre el 6 y 11 de enero de 2020.

3. Investigar si se registraron cambios en una comunidad costera cercana al epicentro del sismo de magnitud 6.4, a causa de los posibles desplazamientos verticales.

Se estarán intentando responder las siguientes preguntas científicas:

1. ¿Qué impactos, si alguno, ha provocado la secuencia sísmica del suroeste de Puerto Rico en la elevación del terreno?
2. ¿Qué impactos, si alguno, ha tenido la secuencia sísmica del suroeste de Puerto Rico en el nivel del mar cerca de la región epicentral?

3. Metodología:

La zona bajo estudio fue el cuadrante suroeste de la isla de Puerto Rico (**imagen 6**), debido a que es la zona donde se ha desarrollado la secuencia sísmica desde el pasado 28 de diciembre de 2019.

Se utilizaron imágenes de nivel 0 del Radar de Apertura Sintética de Banda-

C (C-SAR) para estudiar la deformación vertical del terreno. Este sensor está a bordo del satélite Sentinel 1-A, el cual tiene una resolución temporal de 12 días y una resolución espacial de 15 metros. Las imágenes fueron obtenidas del sitio web de Copernicus de la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés).

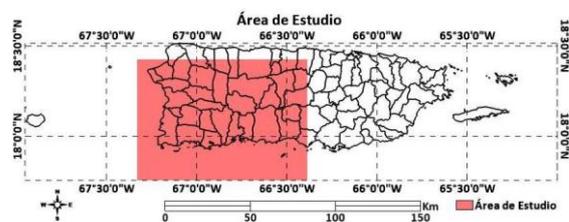


Imagen 6: Área de estudio.

Una de las ventajas del sensor C-SAR es que, al ser un sensor activo, no depende de la luz solar para obtener los datos y, por lo tanto, no se ve afectado por la oscuridad de la noche. Por otro lado, no se ve alterado por la nubosidad ni partículas atmosféricas suspendidas en el aire, lo cual es de gran ayuda ya que en Puerto Rico la nubosidad está presente todo el año a través de distintas zonas.

Para hacer el análisis de la deformación vertical del terreno, se aplicó la técnica de Interferometría de Radar de

Apertura Sintética (InSAR) utilizando la polarización vertical-vertical (VV) del sensor. Este proceso consta de múltiples pasos y requiere dos imágenes de C-SAR para dos fechas distintas. Para propósitos de la investigación, se crearon dos mapas de deformación vertical del suelo para dos lapsos de fechas. El primero fue para la deformación ocurrida entre el 11 de diciembre de 2019 y el 16 de enero de 2020, mientras que el segundo fue para el desplazamiento entre el 16 de enero de 2020 y el 23 de noviembre de 2020. Se utilizó el programa Sentinel Application Platform (SNAP) para hacer la interferometría en un modelo de procesamiento que consta de cinco etapas: 1) Importación de Datos del S-1, 2) Procesamiento InSAR, 3) Procesamiento DInSAR, 4) Phase Unwrapping, y 5) Mapa de desplazamiento. Cada etapa consta de múltiples pasos internos.

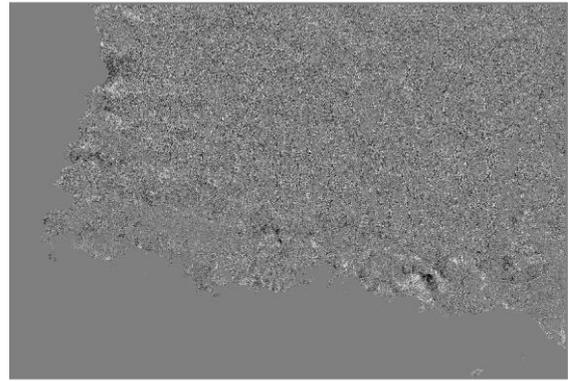


Imagen 7: Datos de nivel 0 del sensor C-SAR captados el 11 de diciembre de 2019 en el suroeste de Puerto Rico.

En la etapa de Importación de Datos del S-1, se introdujeron los dos archivos con datos de nivel 0 del C-SAR para las dos fechas en el programa SNAP (**imagen 7**). Durante el Procesamiento InSAR, se aplicaron los siguientes pasos en SNAP: Read, TOPSAR-Split, Apply Orbit-File, Back-Geocoding, Enhanced Spectral Diversity, Interferogram, TOPSAR-Deburst y Output (write).

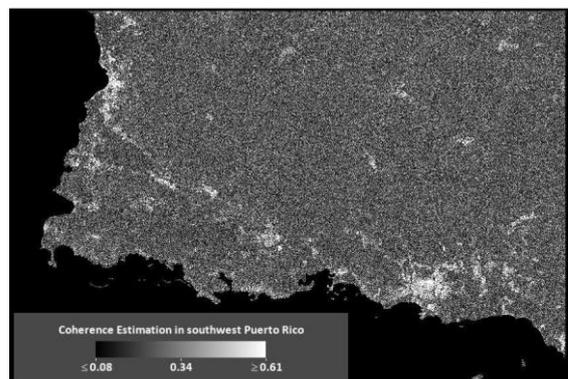


Imagen 8: Estimación de coherencia en la interferometría. Las zonas con valores cercanos a 1 (claros) tendrán mayor precisión que las zonas con valores cercanos a 0 (oscuro) en el mapa final de desplazamiento.

En este proceso, se filtraron los datos y se aplicó la información sobre la órbita del satélite para obtener el interferograma, es decir, la diferencia de fases entre las dos imágenes, con la topografía. También, se obtuvo una imagen de estimación de coherencia, la cual sirve para detectar regiones donde la interferometría puede ser menos precisa, tales como las zonas boscosas de la región montañosa de Puerto Rico (**imagen 8**).

Los píxeles con bajo nivel de coherencia tendrán menor precisión en la interferometría. Mientras, los píxeles coherentes están en resonancia o cerca de estarlo y representan zonas donde la interferometría tiene mucha precisión.

En la etapa de Procesamiento DInSAR, se realizaron los siguientes pasos: Read, TopoPhaseRemoval, Multilook, Goldstein PhaseFiltering / Snaphu Export y Output (write). En esta etapa se hizo georeferenciación y se eliminó la topografía de la interferometría, siendo el producto final la medida de la diferencia de

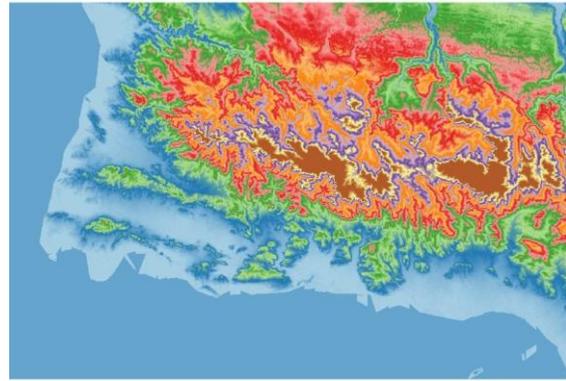


Imagen 9: Topografía obtenida con los datos del sensor C-SAR del cuadrante suroeste de Puerto Rico. Esta data fue eliminada de la interferometría para obtener la deformación neta producida en los dos lapsos de tiempo.

fases entre las dos imágenes, pero sin la topografía. En la **imagen 9** se muestra la topografía eliminada de la interferometría obtenida con los datos del C-SAR.

Luego, en el Phase Unwrapping se realizaron los siguientes pasos: Read, Snaphu Import, Phase-To-Displacement, Range-Doppler-Terrain-Correction y el Output (write). En esta etapa, se extrajo la información del proceso realizado en la etapa del DInSAR para obtener las medidas del desplazamiento vertical, donde se obtuvo el mapa final del desplazamiento vertical con georeferenciación para que se pudiera leer la imagen con el shapefile de los municipios de Puerto Rico cuando se pasara a ENVI (**imagen 10**).

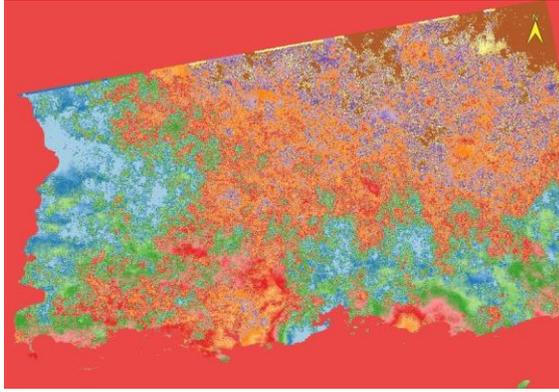


Imagen 10: Mapa de deformación final, sin ser procesado en ENVI.

Finalmente, se guardó el mapa en formato ENVI para exportarlo al programa ENVI (versión 5.6) y asignarle colores adecuados para obtener una leyenda sencilla. También, se añadió una escala horizontal, el símbolo de la brújula, las coordenadas y el grid asociado. Además, se le añadió un shapefile con los municipios de Puerto Rico para que sea mucho más fácil ubicarse geográficamente.

Para estudiar los cambios en el nivel del mar, se utilizaron los datos de nivel 0 del C-SAR para observar la reducción de la región territorial que experimentó el mayor desplazamiento en la zona costera. Para corroborar estos datos, se utilizaron tres imágenes de Google Earth, dos que fueron captadas antes del inicio de la secuencia sísmica y una después del pico de dicha

secuencia. Específicamente, 31 de octubre de 2006, 29 de abril de 2018 y 19 de junio de 2020.

En un compromiso entre escoger imágenes de buena resolución de Google Earth y ser justos con la altura de la marea, las imágenes que se escogieron del 2018 y 2020 fueron captadas en momentos de marea baja y con la mejor resolución posible. Aplicando los conceptos aprendidos en la clase de GEOL 4048 en la UPR-Mayagüez, se analizaron las sombras producidas por el Sol en ambas imágenes y se determinó que la imagen del 2018 fue captada alrededor de las 12:00 p.m. y la del 2020 alrededor de las 11:30 a.m.

Utilizando el mareógrafo más cercano a Guayanilla en el sitio web de la NOAA, se corroboró que en ambos momentos se estaba experimentando la marea baja. El mareógrafo utilizado se encuentra en la Isla de Magueyes en Lajas y su Station ID es 9759110. En la imagen del 2018 (**imagen 11**), la altura de la marea a las 12:00 p.m. era de 0.26 pies. En la

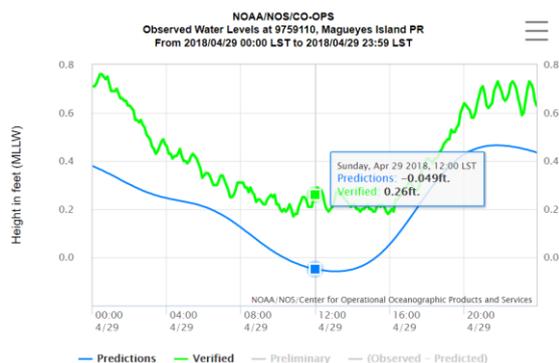


Imagen 11: Mareógrafo de Magueyes Island en Lajas, P.R., del 29 de abril de 2018. Se confirma que la imagen de Google Earth del 2018 se tomó durante la marea baja con un nivel de altura de 0.26 pies. Crédito: [NOAA](#).

imagen del 2020 (**imagen 12**), la altura de la marea a las 11:30 a.m. era 0.10 pies. Esto implica que, aunque ambas imágenes se capturaron en o muy cerca del momento de la marea baja, hay una diferencia de 0.16 pies en la altura del nivel del mar en la imagen de 2018 y la del 2020. Esa diferencia de 0.16 pies equivale a aproximadamente 0.049 metros o 1.93 pulgadas. Sin embargo, esa diferencia es 2.75 veces más pequeña que el cambio en elevación del terreno. Además, es importante destacar que la marea del 2020 es más baja que la del 2018 pero, como se describe en la sección de resultados y discusión, de todas formas en la del 2020 el agua en la zona de Guayanilla alcanzó zonas más altas que la del 2018.

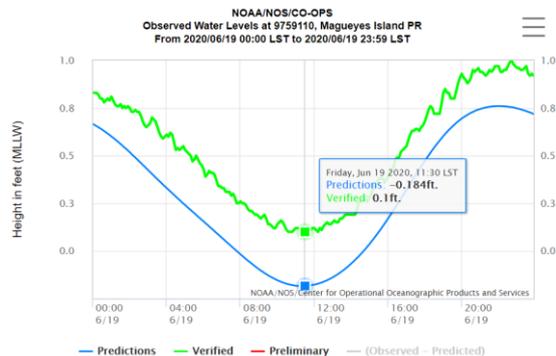


Imagen 12: Mareógrafo de Magueyes Island en Lajas, P.R., del 19 de junio de 2020. Se confirma que la imagen de Google Earth del 2020 se tomó durante la marea baja con un nivel de altura de 0.10 pies. Crédito: [NOAA](#).

4. Resultados y Discusión:

4.1 Deformación del terreno

Al hacer un análisis del mapa de desplazamiento vertical con el Cursor Value de ENVI para el desplazamiento producido entre el 11 de diciembre de 2019 y el 16 de enero de 2020, se encontró un complejo patrón de desplazamiento positivo y negativo en distintas regiones del suroeste de Puerto Rico (**imagen 13**). Sin embargo, como se discutió en la sección de Metodología, la interferometría es menos precisa en las zonas boscosas debido a su dependencia en varios factores como la velocidad del viento, así como el crecimiento de la vegetación con el pasar del tiempo.

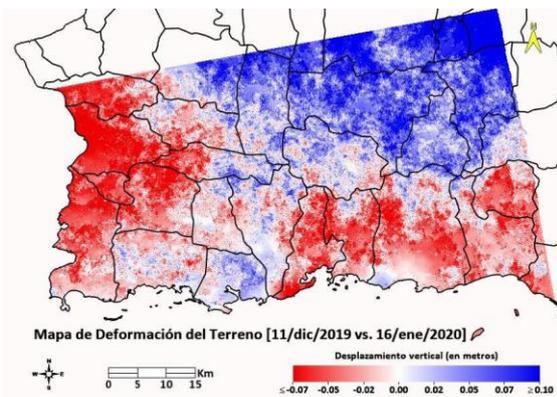


Imagen 13: Desplazamiento observado en la zona suroeste de Puerto Rico entre el 11 de diciembre de 2019 y el 16 de enero de 2020. En este lapso de tiempo ocurrieron los eventos sísmicos de mayor magnitud en la secuencia sísmica, hasta inicios de diciembre de 2020.

Esto pudiera deberse al crecimiento de los árboles y la rapidez del viento que inclina los árboles, lo cual tiende a contaminar el valor de la elevación real del terreno, especialmente si los árboles cubren gran parte del pixel. Por esa razón, es posible que los valores positivos que se aprecian en la zona montañosa de Puerto Rico tengan ese efecto. Esto se repite en la imagen de desplazamiento que se produjo entre el 16 de enero de 2020 y el 23 de noviembre de 2020 que se aprecia en la **imagen 14**.

Este problema, sin embargo, no afecta los resultados observados en la zona epicentral ni en gran parte de la costa sur de Puerto Rico, debido a que esa región tiene un clima árido, es la región más seca de la

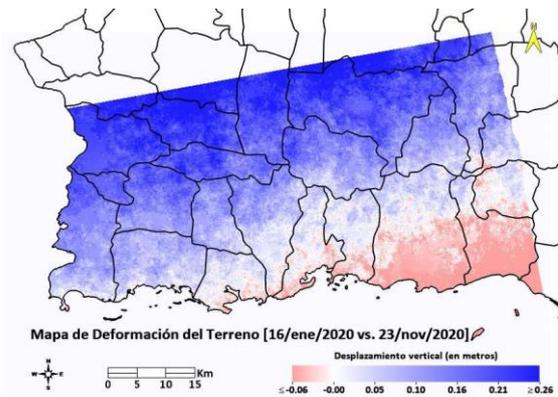


Imagen 14: Desplazamiento observado en la zona suroeste de Puerto Rico entre el 16 de enero de 2020 y el 23 de noviembre de 2020. Este fue el lapso de tiempo escogido para investigar si se había producido un desplazamiento adicional, luego de los terremotos de mayor magnitud de la secuencia sísmica, hasta inicios de diciembre de 2020.

Isla.

Por lo tanto, la densidad de árboles de gran crecimiento vertical es más escasa en la zona sur que en la región montañosa. Del mismo modo, es posible que las zonas terrestres localizadas en las esquinas de la zona barrida por el satélite hayan mostrado datos erróneos ya que, en esas zonas límites, la data que obtiene el sensor tiende a ser menor precisa que en la zona central del barrido, que en este caso es en la zona epicentral. Por esta razón, es posible que el aparente descenso experimentado en la zona de Mayagüez no sea correcto. Haría falta investigar esas zonas más a fondo para

determinar cuán real pueden ser esos dos desplazamientos.

4.1.1 Deformación del terreno en la zona epicentral

a. Desplazamiento ocurrido entre el 11 de diciembre de 2019 y el 16 de enero de 2020

Al analizar la región próxima al epicentro del terremoto de magnitud 6.4 registrado el 7 de enero de 2020, se puede apreciar un descenso notable en el nivel del terreno, mostrado en color rojo intenso en la **imagen 15**.

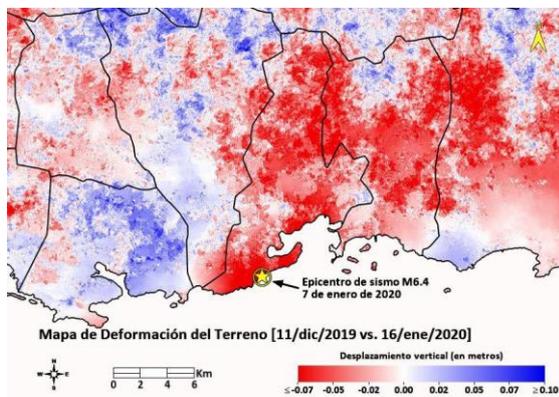


Imagen 15: Desplazamiento observado en la región epicentral entre el 11 de diciembre de 2019 y el 16 de enero de 2020.

Se experimentó un descenso de 0.05 a 0.10 metros (~2-4 pulgadas) en gran parte del municipio de Guayanilla, Peñuelas y Ponce, excepto en zonas aisladas donde el descenso fue menor o ascendió ligeramente. Cerca de la zona epicentral se registraron dos mínimos locales. Uno de

ellos fue localizado a menos de 1km hacia el norte-noroeste del epicentro, en donde varios pixeles estuvieron registrando un descenso de 0.100 a 0.130 metros (~4-5 pulgadas) y un descenso significativo de 0.144 metros (~5.67 pulgadas) en un píxel ubicado a unos 630 metros al norte-noroeste del epicentro del sismo de 6.4.

A unos 4.7 kilómetros al noreste del epicentro, en la comunidad El Faro en Guayanilla, se registró un segundo pico en el descenso del terreno de 0.135 metros (~5.31 pulgadas). Debido a que El Faro es una comunidad costera localmente llana, ese descenso tiene implicaciones significativas en el nivel del mar que serán discutidas en la **sección 4.2**. En la esquina suroeste de Ponce se registró un ascenso localizado de 0.02 a 0.03 metros (0.8 a 1.2 pulgadas). En Guánica, por otro lado, se experimentó un ascenso generalizado de 0.01 a 0.5 metros (0.4 a 2.0 pulgadas).

En el suroeste de Guánica, se observó un pequeño desplazamiento vertical inverso en una línea de

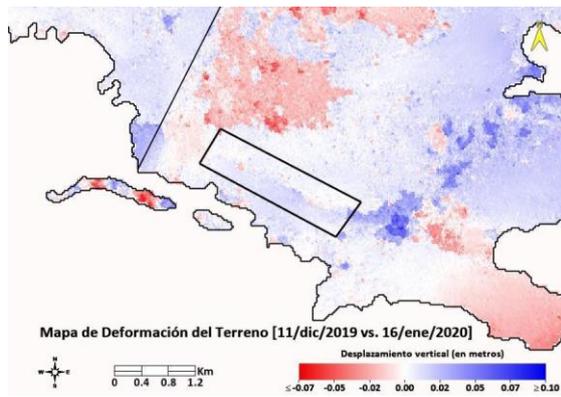


Imagen 16: Desplazamiento observado en la región de la falla de Punta Montalva entre el 11 de diciembre de 2019 y el 16 de enero de 2020.

aproximadamente 2.25 kilómetros de largo, en donde la parte sur mostró un ascenso y la parte norte se mantuvo casi igual o descendió ligeramente (**imagen 16**). El ascenso máximo observado en la mitad sur fue de 0.034 metros (1.34 pulgadas), mientras que el descenso máximo en la mitad norte fue de solo 0.019 metros (0.75 pulgadas). Por esa región de Guánica transcorre la falla de Punta Montalva, por lo que pudiera tratarse de algún tipo de movimiento relacionado a la falla en esa zona. Sin embargo, la falla de Punta Montalva tiene un movimiento de corrimiento lateral izquierdo con pequeñas fallas normales con rumbo (strike) mayormente hacia el noreste (**Roig, Asencio y Joyce, 2013**). Habría que

investigar más a fondo ese posible componente vertical extraño registrado con los datos del satélite a lo largo de una porción de la falla de Punta Montalva para llegar a un análisis más concluyente al respecto.

b. Desplazamiento ocurrido entre el 16 de enero de 2020 y el 23 de noviembre de 2020

Luego de los eventos de mayor magnitud registrados en la secuencia sísmica del suroeste de Puerto Rico, entre el 16 de enero de 2020 y el 23 de noviembre de 2020 el terreno en la zona suroeste continuó deformándose, aunque en menor medida y más lentamente (**imagen 17**).

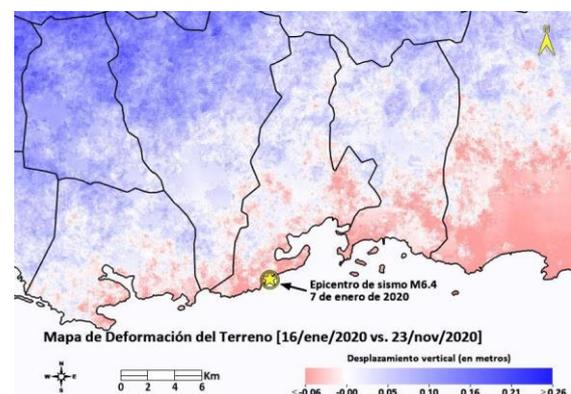


Imagen 17: Desplazamiento observado en la región epicentral entre el 16 de enero de 2020 y el 23 de noviembre de 2020, luego de los sismos de mayor magnitud de la secuencia sísmica, hasta inicios de diciembre de 2020.

Se registró un descenso de 0.02 a 0.09 metros (0.4 a 3.5 pulgadas) en toda la

zona costera desde Guánica hasta Ponce. Como es de notarse, este descenso se produjo durante un periodo de 10 meses, mientras que el lapso de tiempo transcurrido en el análisis de la sección 4.1.1.a fue de poco más de un mes. Los colores de ascenso que se ven en color azul observados en la zona montañosa de Puerto Rico, así como en la costa oeste, pudieran estar errados debido a los factores mencionados en la **sección 4.1**.

4.1.2 Deformación del terreno en el noroeste de Ponce, PR

En la zona oeste de Ponce, en la comunidad de Marueño, fue donde se experimentó el mayor descenso de todo el área del mapa, con un hundimiento de 0.162 metros (~6.41 pulgadas) entre el 11 de diciembre de 2019 y el 16 de enero de 2020. La geología de esta zona es muy variada ya que podemos encontrar un sinnúmero de fallas y diferentes tipos de formaciones geológicas (**imagen 18**). Entre algunas de las formaciones que podemos encontrar en esta zona es la formación de roca ígnea del Lago Garzas. Esta formación es de la edad

geológica del Eoceno-Campaniano Medio y está compuesta por breccia volcánica color rojo oscuro, arenisca volcánica subordinada y flujos de basalto. Otra de las formaciones que podemos encontrar es la de Yauco. Esta formación es de la edad Geológica del Terciario medio/inferior y está compuesta por roca sedimentaria que contiene conglomerados y sedimentos de tamaño limo hasta arena. También, otra de las formaciones que se puede encontrar en esta región es la formación de roca ígnea de Augita Andesita Porfirítica de la edad geológica del Cretácico Superior.

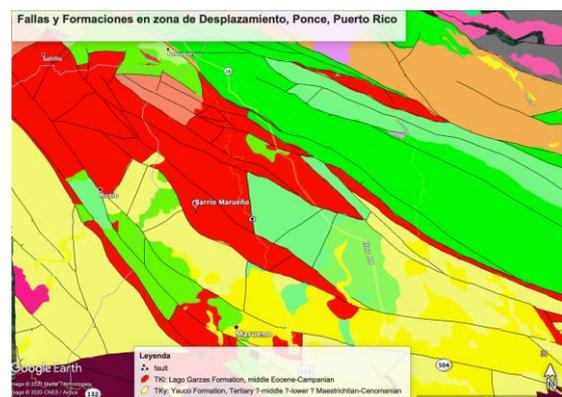


Imagen 18: Fallas y formaciones geológicas en Barrio Marueño, Ponce.

4.2 Cambios en el nivel del mar en la comunidad El Faro, Guayanilla, PR

En la comunidad costera de El Faro en Guayanilla, PR, se experimentó un descenso local máximo de 0.135 metros

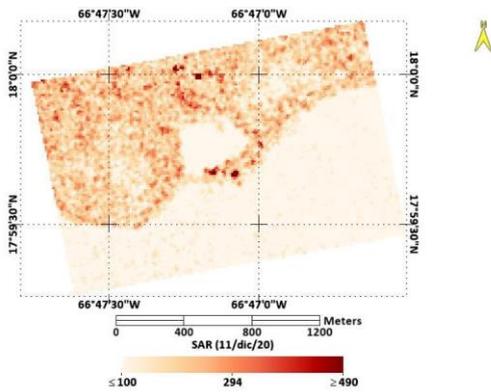


Imagen 19: Imagen de nivel 0 del sensor C-SAR para el 11 de diciembre de 2019 en la región de la comunidad El Faro en Guayanilla, P.R.

(~5.31 pulgadas) entre el 11 de diciembre de 2019 y el 16 de enero de 2020. Este hundimiento del terreno implica un aumento relativo en el nivel del mar y un incremento significativo en el riesgo de inundaciones costeras.

Comparando la imagen de nivel 0 del sensor de C-SAR del 11 de diciembre de 2019 con la del 16 de enero de 2020, se puede apreciar que las zonas costeras de la comunidad El Faro se redujeron (**imágenes 19 y 20**). Mientras, el área de la laguna al noroeste de El Faro se expandió en todas las direcciones debido a que la única barrera natural que evitaba que el agua del Mar Caribe penetrara hacia la laguna quedó parcialmente bajo el nivel del mar debido a un hundimiento del terreno. Esto provocó

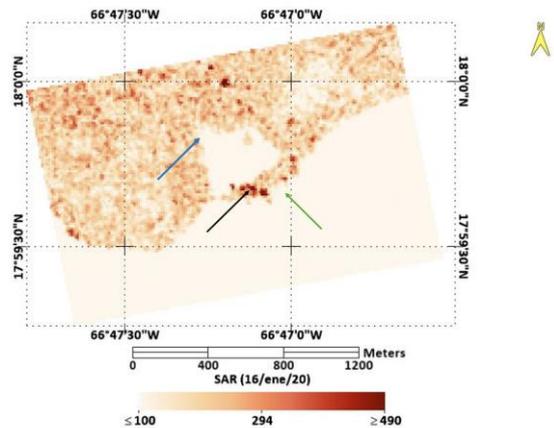


Imagen 20: Imagen de nivel 0 del sensor C-SAR para el 16 de enero de 2020 en la región de la comunidad El Faro en Guayanilla, P.R.

que varias residencias se inundaran durante los primeros días luego del sismo de magnitud 6.4. Para comprobar esta información, se utilizaron tres imágenes de Google Earth. La imagen del 31 de octubre de 2006, en la **imagen 21**, muestra que la playa era pequeña y que el agua de la laguna y del Mar Caribe estaban separadas por varios metros en la esquina suroeste de la comunidad El Faro.



Imagen 21: Imagen de Google Earth de la comunidad El Faro en Guayanilla, P.R., captada el 31 de octubre de 2006. La playa era pequeña y el agua del Caribe estaba separada del agua de la laguna por varios metros.

En la imagen del 29 de abril de 2018 (**imagen 22**), la cual fue captada durante marea baja (**imagen 11**), se observa que la playa se había expandido por varios metros. Esto debido a la construcción de un muelle entre el 2012 y 2013 que, debido a las corrientes marinas provenientes del este sureste, fue acumulando arena con el paso de los años, dando lugar a la formación de un “jetty”. También, se puede observar que la laguna estaba seca, lo cual se confirma por los rastros de neumáticos de vehículos que habían transitado por la zona de la laguna. Esto pudiera significar que la laguna era intermitente, no tenía agua siempre. Una vez comienza la secuencia sísmica y ocurren los terremotos de mayor



Imagen 22: Imagen de Google Earth de la comunidad El Faro en Guayanilla, P.R., captada el 29 de abril de 2018 durante la marea baja. La playa se había expandido debido a un jetty que se formó por la construcción de un muelle entre el 2012 y 2013. La laguna estaba seca.

magnitud, la playa que se había formado a consecuencia de la construcción del muelle quedó bajo agua nuevamente. En adición a eso, la barrera natural de arena que mantenía el agua del Mar Caribe separada de la zona de la laguna quedó parcialmente bajo agua. Por esa razón y desde entonces, las ocho imágenes posteriores al evento principal que se han captado en Google Earth (9/enero, 11/enero, 14/enero, 5/mayo, 6/junio, 19/junio, 4/agosto y 18/agosto, todas en el 2020) muestran a la laguna de El Faro llena de agua. En base a esos datos, la laguna localizada al noroeste de El Faro en Guayanilla no ha vuelto a secarse por completo, como lo hacía en los años previos al inicio de la secuencia.



Imagen 23: Imagen de Google Earth de la comunidad El Faro en Guayanilla, P.R., captada el 19 de junio de 2020, también durante marea baja. La playa que se había formado quedó bajo agua y varias residencias quedaron inundadas. La barrera que mantenía las aguas del Caribe y la de la laguna separadas quedó parcialmente bajo agua

Es posible que, debido a la secuencia sísmica, la laguna de El Faro haya pasado a ser permanente. De la misma manera, varias residencias cercanas a esa barrera natural han estado inundadas desde entonces, al menos de forma parcial. La **imagen 23**, captada el 19 de junio de 2020, también fue captada en marea baja (**imagen 12**) y, de todas formas, se aprecian residencias inundadas. Típicamente para esa zona, entre la marea alta y la baja hay entre 0.5 a 1.0 pies de diferencia, por lo que durante las horas de marea alta la situación puede ser mucho peor para los residentes de El Faro en Guayanilla, PR.



Imagen 24: Inundación debido al incremento en el nivel del mar en la comunidad El Faro, Guayanilla, P.R. Crédito: Rose Vélez / [Univisión](#)

Como resultado del hundimiento observado, las zonas costeras de Yauco, Guayanilla, Peñuelas y porciones de Ponce

ahora se encuentran en un mayor riesgo de inundaciones costeras ante eventos de marejada y oleaje causados por los fenómenos atmosféricos, lo cual es preocupante dada la expectativa de fenómenos más extremos debido al cambio climático. La comunidad El Faro está en un riesgo mayor ya que adición tienen que lidiar con la laguna ubicada al noroeste y con zonas que ya se inundaron de forma permanente (**imagen 24**).

5. Conclusión:

La Secuencia Sísmica del suroeste de Puerto Rico que inició en diciembre 2019 y alcanzó un pico entre el 6 al 11 de enero 2020, ha demostrado ser una de las más activas registradas en el mundo. A consecuencia de los sismos de mayor magnitud, se registró un descenso de 0.05 a 0.10 metros (~2 a 4 pulgadas) en gran parte de los pueblos de Guayanilla, Peñuelas y Ponce y un ascenso en la zona de Guánica de 0.01 a 0.5 metros (0.4 a 2.0 pulgadas). En la zona suroeste de Guánica, posiblemente a lo largo de la falla Punta

Montalva, se observó un desplazamiento con un pequeño componente vertical, a pesar de que dicha falla tiene un movimiento de corrimiento lateral izquierdo. En la mitad sur de la línea (posible falla Punta Montalva) se registró un ascenso de 0.034 metros (1.34 pulgadas) y en el norte se mantuvo casi igual, pero bajó en puntos aislados hasta 0.019 metros (0.75 pulgadas).

A 630 metros hacia el nortenoeste del epicentro del terremoto de magnitud 6.4, se observó un hundimiento de 0.144 metros (~5.67 pulgadas) y en la comunidad El Faro en Guayanilla hubo un descenso de 0.135 metros (~5.31 pulgadas). A consecuencia de este hundimiento, hubo un aumento relativo en el nivel del mar, significativamente en la comunidad El Faro. Esto causó que la playa que venía creándose quedara completamente bajo agua y que la laguna y algunas residencias, al menos parcialmente, se inundaran de forma permanente. El nivel de riesgo a las inundaciones costeras ya sea por eventos

meteorológicos o tsunamigénicos aumentó significativamente en las costas de Guayanilla y en menor medida en las costas de Guánica, Yauco, Peñuelas y Ponce.

6. Recomendaciones:

Es extremadamente importante continuar monitoreando las deformaciones del terreno, especialmente en las zonas costeras. Esto para evaluar el riesgo de inundaciones costeras y para saber a qué comunidades costeras se les debe dar prioridad para la posible reconstrucción o reubicación de sectores que queden en extremo riesgo de este tipo de inundaciones o que queden permanentemente inundados. La comunidad El Faro en Guayanilla es una de esas comunidades en alto riesgo de quedar inhabitable, especialmente si ocurre un evento sísmico de mayor magnitud que pueda provocar un hundimiento aún más significativo.

Por otro lado, se recomienda encarecidamente a revisar los Mapas de Desalojo de Tsunami de la [Red Sísmica de Puerto Rico](#), si es que todavía no se está

haciendo, considerando estos cambios en el relieve costero.

Finalmente, se recomienda ubicar instrumentos de medición en el campo, como instrumentos de GPS, para tener datos mucho más precisos sobre los desplazamientos verticales y horizontales que están ocurriendo en las fallas en la zona suroeste de Puerto Rico. De esta manera, se podrán hacer mejores análisis sobre el movimiento de las principales y menores fallas en esa zona, así como los desplazamientos debido a los terremotos de mayor magnitud.

7. Referencias

Braun, A., & Veci, L. (2020). *TOPS*

Interferometry Tutorial. SkyWatch Space Applications.

Red Sísmica de Puerto Rico. (n.d.). Retrieved

November 10, 2020, from

<http://redsismica.uprm.edu/>

Roig-Silva, C. M., Asencio, E., & Joyce, J.

(2013). The northwest trending north Boquerón Bay-Punta Montalva Fault Zone; A through going active fault system in southwestern Puerto Rico.

The Northwest Trending North

Boquerón Bay-Punta Montalva Fault

Zone; A through Going Active Fault

System in Southwestern Puerto Rico,

84(3), 538-550.

doi:10.1785/0220120115

Sci Hub Copernicus (n.d.). Retrieved

November 9, 2020, from

<https://scihub.copernicus.eu/dhus/>

Search Earthquake Catalog. (n.d.). Retrieved

November 12, 2020, from

<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

Univision, P. (2020, February 15). Esta es la

comunidad de Guayanilla que se está

hundiendo por los terremotos en el

sur. Retrieved September 20, 2020,

from

<https://www.univision.com/local/puerto-rico-wl/esta-es-la-comunidad-de-guayanilla-que-se-esta-hundiendo-por-los-terremotos-en-el-sur-fotos>

los-terremotos-en-el-sur-fotos

los-terremotos-en-el-sur-fotos

los-terremotos-en-el-sur-fotos

Water Levels - NOAA Tides & Currents.

(n.d.). Retrieved November 20, 2020,

from

<https://tidesandcurrents.noaa.gov/waterlevels.html?id=9759110>

waterlevels.html?id=9759110